

Petr KONEČNÝ¹, Jiří BROŽOVSKÝ², Pratanu GHOSH³

**MODELOVÁNÍ VLIVU CHLORIDŮ NA VZNIK TRHLIN V ŽELEZOBETONU
PROGRAMEM KOROZEENECK**

**EVALUATION OF CHLORIDE INFLUENCE ON THE CRACKS IN REINFORCED CONCRETE
USING KOROZEENECK SOFTWARE**

Abstrakt

Program Korozeeneck umožňuje provádět deterministické a stochastické modelování degradace železobetonové konstrukce. Ke stochastické aplikaci je nutné použít spolehlivostní nástavbu Monte. Korozeeneck modeluje jak iniciační, tak propagační fázi koroze. Umožňuje odhadnout dobu do vzniku koroze ocelové výztuže v železobetonové konstrukci, a také dobu do vzniku rovnoměrnou korozi vyvolaných trhlin. Příspěvek obsahuje jak popis analytického modelu užitého v programu Korozeeneck, tak příklad deterministické aplikace.

Klíčová slova

Železobeton, koroze, trhlina, výztuž, chloridy, iniciace, propagace.

Abstract

Korozeeneck software allows for deterministic as well as stochastic modeling of chloride induced degradation of reinforced concrete structures. Korozeeneck describes both stages (initiation as well as propagation). It helps to estimate time to initiation of corrosion in reinforced concrete structures. Time to unacceptable cracking caused by uniform corrosion can be assessed. The Monte reliability tool is necessary in order to perform stochastic analysis. Paper consists of description of analytical model used in program Korozeeneck as well example of a deterministic application.

Keywords

Reinforced concrete, corrosion, crack, reinforcement, chlorides, initiation, propagation.

1 ÚVOD

Spolehlivost železobetonových konstrukcí je v mnoha případech ovlivněna časově závislými degradačními procesy, díky kterým mnoho konstrukcí vyžaduje předčasnou rekonstrukci, či výměnu. Snížení životnosti vede obvykle k nárůstu celkových nákladů, čímž dochází v případě mostních konstrukcí ke zvýšenému zatížení veřejných rozpočtů. Harmonie mezi náklady na pořízení a celkovými náklady stavby hraje důležitou roli. Je proto důležité budovat konstrukce mající dlouhou životnost, čehož lze dosáhnout vhodnou předpovědí degradačních mechanismů. Kvalitní odhad

¹ Ing. Petr Konečný, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 384, e-mail: petr.konecny@vsb.cz.

² Doc. Ing. Jiří Brožovský, Ph.D., Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Poděště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 321, e-mail: jiri.brozovsky@vsb.cz.

³ Pratanu Ghosh, MSc., Ph.D., Civil and Environmental Engineering Department, University of Utah, Meldrum Civil Engineering, 110 S. Central Campus Dr., Suite 2000B, Salt Lake City, UT 84112, USA, e-mail: pratanug@gmail.com.

degradačních procesů umožní odborníkům lépe navrhovat železobetonové konstrukční systémy tak, aby byly dlouhodobě odolné vůči působení prostředí a zatížení.

Zakomponování trvanlivosti do veřejné infrastruktury nebo průmyslových objektů vyžaduje pokročilé znalosti degradačních mechanismů, stavebních materiálů, posudku spolehlivosti, kontroly kvality a konstrukčních postupů. Přesto, že je zřejmá nutnost navrhovat konstrukce s dlouhou životností, nástroje a pomůcky k dosažení tohoto cíle jsou stále ve vývoji.

V inženýrské komunitě roste poptávka po funkčně orientovaném přístupu k návrhu stavebních konstrukcí, který by zohledňoval požadovanou úroveň spolehlivosti, životnost, optimalizaci celkových nákladů stavby a vlivů na životní prostředí. Pozornost je tedy upřena k relativně novému přístupu zvanému Performance-Based Design (volně přeloženo dle [28] jako Posudek spolehlivosti s ohledem na užité vlastnosti, viz např. [27], [13]).

Chloridy pronikají skrz krytí k ocelové výztuži a vyvolávají korozi výztuže. Typickými představiteli jsou konstrukce vystavené mořskému prostředí a silniční konstrukce vystavené účinkům posypových solí. Rozmrazovací prostředky jsou jedním z nejvýznamnějších faktorů snižujících životnost silniční železobetonové infrastruktury jak ve střední Evropě, tak na severovýchodě USA. Chloridy vyvolaná koroze může způsobit pokles užité hodnoty konstrukce nejen s ohledem na použitelnost, ale i na únosnost, a ve svém důsledku může vézt ke zvýšeným nákladům životního cyklu mostu.

2 ÚČEL PROGRAMU KOROZEENEC

Program Korozeenec [17] je vyvíjen za účelem provádění deterministického a stochastického modelování degradace železobetonové konstrukce s ohledem na působení chloridů. Program si klade za cíl umožnit získání lepší představy o chování konstrukce vystavené agresivnímu prostředí. Aktuální verze [17] pracuje s 1D modelem, který je vhodný např. pro popis ŽB desky.

Přístup implementovaný v programu Korozeenec doplňuje odhad doby propagace koroze dle VIDAL et. al [32]. Model [32] je doplněn o odhad korozního proudu dle MORRIS et. al [25] a dále o období iniciace, čímž odhadne celkovou životnost konstrukce. Program se snaží odhadnout dobu do vzniku koroze ocelové výztuže v železobetonové konstrukci, a také dobu do vzniku rovnoměrnou korozi vyvolaných trhlin. Ke stochastické aplikaci je nutné použít spolehlivostní nastavbu Monte [2].

Následující části obsahují popis transformačních vztahů aplikovaných v programu Korozeenec a také příklad deterministické aplikace. Příklad pravděpodobnostní aplikace je v plánu pro navazující práce.

3 MODELOVÁNÍ KOROZE VYVOLANÉ PŮSOBENÍM CHLORIDŮ

Úroveň spolehlivosti železobetonové konstrukce se mění s postupem degradačního procesu a dobou života železobetonové konstrukce. Je-li koroze vyvolána vniknutím chloridů k ocelové výztuži uvažována jako dominantní parametr ovlivňující degradaci, lze tento proces s ohledem na korozi rozdělit do dvou období [31]:

$$t_{\text{service}} = t_{\text{initiation}} + t_{\text{propagation}}, \quad (1)$$

kde je $t_{\text{initiation}}$ čas do vzniku koroze a $t_{\text{propagation}}$ odpovídá času do dosažení neúnosného stupně koroze železobetonové výztuže.

3.1 Iniciace koroze

Období iniciace koroze končí depasivací výztuže. Výztuž může začít korodovat a nastává tvorba korozních produktů. Úroveň spolehlivosti - užitnosti může být konzervativně vztažena k době do započetí koroze $t_{\text{initiation}}$ ([15], [29], [27] a [6]). Spolehlivost lze také posuzovat ve vztahu ke vzniku trhlin, jak je uvedeno dále v části 3.3 „*Propagace koroze*“.

Konec iniciační fáze je vyjádřen za pomoci porovnání koncentrací chloridových iontů na úrovni výztuže $C_{xy,t}$ a chloridové prahu C_{th} . (koncentrace postačujících k započetí koroze, viz např. [12]). Koncentrace chloridů na úrovni výztuže $C_{xy,t}$ je popsána v následující části.

3.2 Degradční model

Koroze ocelové výztuže je primárně řízena difuzí chloridů. Vliv hydraulického tlaku a kapilární sorpce není v aplikovaném modelu zohledněn, neboť je mnoho případů, kdy je jejich vliv možno zanedbat (např. ŽB mostovka [14]). Postup pronikání chloridů betonem jako funkce hloubky a času lze modelovat za pomoci 2. Fickova zákona difuze, ([34], [29], [6], [23] a [24]). Řešení příslušné diferenciální rovnice, obvykle nazývané jako Crankovo, je uvedeno v následujícím vztahu [4]:

$$C_{x,t} = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c t}} \right) \right], \quad (2)$$

kde je $C_{x,t}$ koncentrace rozpustitelných chloridových iontů (jako procento hmotnosti materiálů s cementačními schopnostmi) v čase t (roky) a hloubce x (metry). C_0 je koncentrace chloridů (% hmotnosti cementu atd.) v povrchové vrstvě betonu a D_c je tzv. „zjevný“ koeficient difuze (m^2/rok). Difuzní koeficient je prozatím uvažován v průběhu života konstrukce jako konstantní. Zavedení závislosti D_c na čase je v plánu vývoje programu Korozeeneck.

Vztah (2) je široce užívaným pro 1-D modelování pronikání chloridů, i když nepostihuje kombinovaný transport vody a chloridových iontů [5], a také neumožňuje popisovat specifické okrajové podmínky nutné pro zohlednění vlivu trhliny. Numerické řešení vztahu (2) představuje následující polynom:

$$C_{x,t} = C_0 \left\{ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{14} \frac{(-1)^n \left(\frac{x}{\sqrt{4D_c t}} \right)^{2n+1}}{n!(2n+1)} \right\} \quad (3)$$

TIKALSKY v [29] uvádí při užití 14 členů polynomu akceptovatelnou chybu 0.001 pro hloubku výztuže 0 – 1 metr, difuzní součinitel betonu mezi 1×10^{-8} a $1 \times 10^{-14} \text{ m}^2/\text{s}$ a zkoumanou životnost do 100 let.

Chování ŽB konstrukce je popsateľné s ohledem na iniciaci koroze funkcí spolehlivosti $RF_{t,\text{initiation}}$. Funkce spolehlivosti je vyjádřena jako časově závislé překročení korozního prahu C_{th} koncentrací chloridů $C_{x,t}$ v hloubce výztuže:

$$RF_{t,\text{initiation}} = C_{th} - C_{x,t}. \quad (4)$$

Hodnota limitní koncentrace chloridů C_{th} závisí zejména na druhu a přípravě výztužných vložek a na složkách betonu. Typické hodnoty pro ŽB mostovky jsou 0.2 % hmotnosti chloridů v poměru k hmotnosti cementu dle ACI 222R-01 a 0.4 % dle CEB [3]. Data pro ocel se speciální ochranou uvádí [7]. Širší diskuzi nad velikostí chloridového prahu uvádí [12].

Je-li koncentrace chloridů v místě výztuže $C_{x,t}$ větší než chloridový práh C_{th} , končí období iniciace a začíná období koroze. Doba, ve které dojde k iniciaci koroze, je označena $t_{\text{initiation}}$.

3.3 Propagace koroze

Během procesu koroze vznikají korozní produkty, které mají rozdílné fyzikálně chemické vlastnosti než původní materiál. Dochází k nárůstu objemu výztuže a zároveň poklesu efektivní průřezové plochy, což vede k poklesu únosnosti.

Program se zabývá odhadem času do vzniku trhlin v krytí betonu v důsledku objemových změn výztuže pro rovnoměrnou korozi vyvolanou působením chloridových iontů. Postup umožňuje zohlednit působení důlkové koroze.

Výpočet doby do vzniku trhlin je založen na vztazích odvozených z experimentů VIDAL et. al [32]. Tyto laboratorní experimenty byly prováděny na ŽB trémci vystavených působení chloridů a akcelorované korozi. Model [32], doplněný o výpočet korozního proudu dle MORRIS et.

all [25], je zajímavý možností popisu průběhu důlkové koroze. Zvolený přístup byl na případě rovnoměrné koroze porovnán s modelem [LIU and WEYERS [19]. Získané výsledky popsané délkou propagační fáze byly obdobné.

Model popsáný v [32] limituje propagační fázi vznikem trhliny o nepřijatelné šířce:

$$w_{cr} < w = K(\Delta A_s - \Delta A_{s0}), \quad (5)$$

kde je w_{cr} limitní velikost trhliny a w modelem odhadnutá velikost trhliny závisící na regresním součiniteli K , korozi vyvolaným úbytkem průřezové plochy ΔA_s a úbytkem průřezové plochy ΔA_{s0} v době vzniku nepřijatelné trhliny. Regresní koeficient K je podle [32] roven 0.575.

Následující vztah uvádí korozi vyvolaný úbytek průřezové plochy ΔA_s

$$\Delta A_s = \frac{\pi}{4} (2\alpha_{corr_type} x_D D - \alpha_{corr_type}^2 x_D^2), \quad (6)$$

kde α_{corr_type} zohledňuje druh koroze, x_D představuje hloubku koroze a D je průměr výztuže [mm]. Hloubka koroze x_D je pak:

$$x_D = V_{corr} \times t = 11.6 \times i_{corr} \times t, \quad (7)$$

kde je hustota korozního proudu i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]. V aplikovaném modelu byla zvolena pro hustotu korozního proudu závislost na odporu betonu ρ (resistivity [Ohm-cm]) (Fig. 12, MORRIS et. al [25]):

$$i_{corr} = 55000 \times \rho^{-1.3} \quad (8)$$

a korozní rychlost V_{corr} [$\mu\text{m}/\text{rok}$] závisí na hustotě korozního proudu

$$V_{corr} = 11.6 \times i_{corr}. \quad (9)$$

Další modely popisující hustotu korozního proudu uvádí např. [8].

Ve vztahu pro odhad šířky trhliny (12) figuruje výpočet úbytku průřezové plochy v době vzniku nepřijatelné trhliny ΔA_{s0} , přičemž x_C je tloušťka krytí:

$$\Delta A_{s0} = \frac{\pi \times D^2}{4} \left[1 - \left[1 - \frac{\alpha_{corr_type}}{D} \times \left(7.53 + 9.32 \times \frac{x_C}{D} \right) \times 0.001 \right]^2 \right], \quad (10)$$

Úbytek plochy výztuže v čase (6) popisuje kvadratická funkce. Čas do vzniku koroze t je možno řešit následovně:

$$At^2 + Bt + C = 0, \quad (11)$$

kde t představuje $t_{\text{propagation}}$ a kde jsou konstanty A, B a C definovány následovně:

$$A = \sqrt{0.0001V_{corr}} \frac{\pi}{4} \alpha_{corr_type}^2, \quad B = 0.0001V_{corr} \frac{\pi}{4} 2D\alpha_{corr_type}, \quad C = \Delta A_{s0} + \frac{w_{cr,lim}}{0.0575}. \quad (12)$$

Limitní šířka trhliny je uvažována jako $w_{cr} = 0.1$ mm. V programu je užito $\alpha_{corr_type} = 2$ pro rovnoměrnou korozi. Vyšší hodnoty popisuje korozi důlkovou.

Druhý kořen kvadratické rovnice je pak doba propagační fáze $t_{\text{propagation}}$, tedy doba od započetí koroze do vzniku nepřijatelných trhlin. Celková doba do vzniku nepřijatelných trhlin je v programu označena jako t_{service} a je součtem doby iniciace s dobou propagace koroze (1).

Funkce spolehlivosti popisující dobu života konstrukce s ohledem na vznik trhlin je vyjádřena porovnáním doby do vzniku nepřijatelných trhlin t_{service} a požadované doby provozu konstrukce t_{required} :

$$RF_{t,service} = t_{\text{service}} - t_{\text{required}} \quad (13)$$

3.4 Stochastické modelování - Simulation-Based Reliability Assessment

Vzhledem k velkému rozptylu vstupních parametrů je vhodné pravděpodobnostní řešení dané problematiky. K řešení je možno zvolit metodu SBRA [21] (SBRA, viz MAREK, et. al. [21], [22], [20]). Ta je vhodná k aplikaci v oblasti stochastické analýzy degračních procesů.

Náhodně proměnné jsou v metodě SBRA charakterizovány pravděpodobnostní funkcí (obvykle useknutými histogramy). Náhodně proměnné vstupy je možno korelovat s využitím přístupu [26]. Možnost korelace byla ověřena v [18], a je v programu Monte [2] implementována. Pravděpodobnost překročení vybraných referenčních hodnot je počítána s využitím simulačních nástrojů typu Monte Carlo a úroveň spolehlivosti je vyjádřena za pomoci porovnání pravděpodobnosti poruchy P_f s návrhovou pravděpodobností P_d . Požadovaná referenční kritéria a návrhové hodnoty mohou být ušity na míru konkrétnímu inženýrskému problému, tak aby odpovídaly účelu objektu, jeho umístění, očekávání klienta apod.

BRADÁČ [1] uvedl metodu SBRA na pole posudků trvanlivosti železobetonových konstrukcí. TIKALSKÝ a kol. následně obohatili využití metody SBRA o oblast Performance-Based Design železobetonových konstrukcí ([29], [20], [30] a [16]). Obohacení spočívá v analogii, jak mezi zatížením a působením agresivních chemikálií, tak mezi odolností a schopností vzdorovat agresivním látkám. Posypové soli představují zatížení chloridy, které pronikají do betonu v čase, a koroze započne, pokud je dostatečné množství chloridových iontů, vlhkosti a kyslíku dostupné na úrovni výztuže.

Je vhodné poznamenat, že především pro rozsáhlejší konstrukce (mosty, dlouhé nebo vysoké stěny atp.) se často uvažuje plošná variabilita základních veličin C_0 a D_c (viz např. [33] a [9]).

4 UKÁZKA DETERMINISTICKÉHO VÝPOČTU

Na ilustrativním příkladu železobetonové desky představující mostovku s nechráněnou výztuží vystavenou působení posypových solí je ukázán odhad doby do vzniku koroze a následných korozi vyvolaných trhlin.

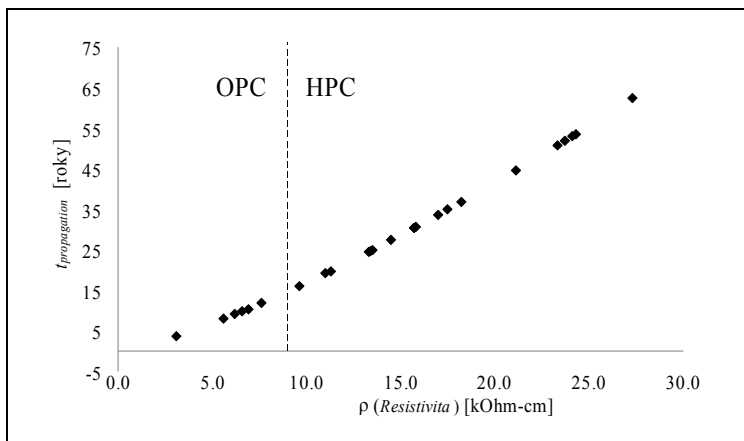
4.1 Vstupy

Vstupní parametry je možno zadat z příkazového řádku, nebo je možno tyto veličiny načíst ze vstupního souboru. První vstupní hodnota je difuzní součinitel $D_c = 4.91 \text{ [m}^2\text{s}^{-1} \times 10^{-12}]$, následuje hloubka výztuže $x_c = 0.075 \text{ [m]}$, koncentrace chloridů na povrchu betonu $C_0 = 1.11 \text{ [% materiálu s cementačními vlastnostmi]}$, odpor betonu vůči průchodu el. proudu (resistivita) $\rho = 6.6 \text{ [kOhm-cm]}$, průměr výztuže $D = 19 \text{ [mm]}$, chloridový práh pro nechráněnou ocelovou výztuž $C_{th} = 0.27 \text{ [% materiálu s cementačními vlastnostmi]}$.

Hodnoty parametrů D_c , x_c , C_0 a C_{th} jsou získány jako průměry z náhodných veličin aplikovaných v práci [11]. Ta popisuje problematiku ŽB mostovky vystavené působení chloridů. Hodnota pro resistivitu byla zvolena s ohledem na laboratorní měření [10] a hodnota chloridového prahu C_{th} je zvolena dle dat dostupných v [7].

4.2 Odhad trvání iniciační fáze a propagační fáze

Program Korozeneck [17], obsahující model uvedený v části 3 *Modelování koroze vyvolané působením chloridů*, je použit k odhadu vývoje koroze. Koroze je iniciována, pokud koncentrace solí na úrovni výztuže $C_{xy,t}$ (viz (2) a (3)) překročí chloridový práh C_{th} , viz (4). Ve zvoleném příkladu nastane depasivace výztuže v čase $t_{initiation} = 13.7$ roků. V čase $t_{initiation}$ začne ocelová výztuž korodovat. Rozpínající se korozní produkty namáhají betonové krytí výztuže. Překročí-li napětí v krytí mez pevnosti betonu v tahu, vzniknou v krytí trhliny. Překročí-li velikost trhliny v krytí zvolenou limitní hodnotu je konstrukce považována za nespolehlivou, v modelu je ukončena propagační fáze koroze $t_{propagation}$. Konstrukce začíná být vážně ohrožena působením posypových solí. Zde je $t_{propagation} = 10,7$ roků, viz (12). Chloridy pronikají k výztuži z mnohem větší intenzitou a vývoj koroze doprovázený poklesem únosnosti se rovněž urychluje. Součtem iniciační a propagační fáze je životnost konstrukce $t_{service} = 24.3$ roků, viz (1).



Obr. 1: Odhad propagační fáze koroze $t_{propagation}$ v závislosti na kvalitě betonu popsané odporem vůči průchodu elektrického proudu - resistivitě ρ pro krytí $x_C = 63,5$ mm a průměr výztuže $D = 19$ mm (OPC představuje běžný beton, HPC představuje vysokohodnotný beton). Podrobnosti viz [10].

5 POROVNÁNÍ PROPAGAČNÍ FÁZE KOROZE V ZÁVISLOSTI NA KVALITĚ BETONU

Graf na obr. 1 ilustruje vliv kvality betonu na propagaci koroze. Aplikovaný model [32] odhaduje, že propagační fáze u běžných betonů trvá mezi 5 a 20 lety, zatímco u betonů vysokohodnotných se délka propagační fáze pohybuje v rozmezí 20 až 65 let.

6 ZÁVĚR

V příspěvku je předvedena ukázka využití programu Korozeeneck 1.0 [17] k odhadu vlivu chloridů na trvanlivost železobetonových konstrukcí. Modelována je doba do vzniku koroze a následná doba do nepřijatelného rozvoje trhlin, které jsou vyvolány objemovými změnami výztuže.

Zvolený model řeší 1D problém železobetonové desky vystavené působení chloridů. Iniciační fáze je modelována za pomoci difuze. Propagační fáze koroze je popsána s využitím modelu pro rovnoměrnou korozi [32]. Zvolený model je doplněn odhadem iniciační fáze a výstupem je životnost, sestávající z iniciační a propagační fáze koroze. Postup popsáný v [32] byl zvolen proto, neboť umožňuje v budoucnu modelovat i důlkovou korozi, která je typická pro působení chloridů.

Vzhledem k velkému rozptylu vstupních parametrů je vhodné pravděpodobnostní řešení dané problematiky. Naznačený postup obsahuje pouze deterministické řešení, ale pravděpodobnostní aplikace je v kombinaci se software Monte [2] možná. Příklad pravděpodobnostní aplikace je v plánu pro navazující práci.

Aproximace šířky trhliny pomocí regresního koeficientu K (viz [32]) umožňuje vystihnout trendy závislosti mezi materiálovými charakteristikami a délkou propagační fáze koroze železobetonové konstrukce vystavené působení chloridů. Tato oblast zasluhuje další pozornost, a to zejména s ohledem na možnost aplikace nelineární lomové mechaniky s cílem numericky modelovat chování krytí vystavené působení narůstajícího objemu výztuže.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finančního přispění Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR z Operačního programu: OP Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK) v rámci projektu „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební VŠB-TUO“ projekt č. CZ.1.07/2.3.00/20.0013.

LITERATURA

- [1] BRADÁČ, J. and MAREK, P. Application of Simulation-based Reliability Assessment, SBRA, for Lifetime Prediction of Concrete Structures. Proceedings: 8th *International Conference on Life Prediction and Aging Management of Concrete Structures, RILEM*, Bratislava, 1999. (in English).
- [2] BROŽOVSKÝ, J., The home page of the “Monte” simulation software, 2006: <<http://fast10.vsb.cz/brozovsky/monte>>.
- [3] CEB *Design Guide for Durable Concrete Structures*, Thomas Telford Publishers, 2004, ISBN: 0-7277-1620-4.
- [4] COLLEPARDI, M., MARCIALIS, A., and TURRIZUANI, R. “Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes,” *Journal of American Ceramic Research Society*, V55, No. 10, 1972, pp 534-535.
- [5] ČERNÝ, R., PAVLÍK, Z., ROVNANÍKOVÁ, P. Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar, *Cement and Concrete Composites*, 2004, vol. 26, no. 6, 2004, s. 705-715. ISSN 0958-9465.
- [6] DAIGLE, L., LOUNIS, Z., CUSSON, D. “Numerical Prediction of Early-Age Cracking and Corrosion in High Performance Concrete Bridges – Case Study“, downloaded: August 22, 2006 available on-line: <<http://www.tac-atc.ca/english/pdf/conf2004/Daigle.pdf>>, 2004.
- [7] DARWIN, D., and J. BROWNING. Critical Chloride Corrosion Threshold of Galvanized Reinforcing Bars. *ACI Materials Journal*, Vol.106, No.2, 2009, pp.176-183.
- [8] fib, *Model Code for Service Life Design*, fib Bulletin 34, Model Code, 116 pages, ISBN 978-2-88394-074-1, 2006.
- [9] FABER, M. H., ROSTAM, S. Durability and Service Life of Concrete Structures – the Owners Perspective. In Proceedings of the *International IABSE Conference on Safety, Risk, and Reliability - Trends in Engineering*, Malta, March 2001, ISBN: 3-85748-102-4.
- [10] GHOSH, P., HAMMOND, A. and TIKALSKY, P. J. “Correlation of CIPT and Resistivity Data in Different Curing Condition”, In preparation for 9th Symposium for High Performance Concrete, Christchurch, New Zealand, August, 2011.
- [11] GHOSH, P., KONEČNÝ, P. and TIKALSKY, P. J. “SBRA Model for Corrosion Initiation in Concrete Structures” The Joint fib-Rilem Workshop on Modeling of Corrosion Concrete Structures, Madrid, Spain, November, ISBN: 978-94-007-0676-7, pp. 85-100, 2010.
- [12] GLASS, G. K. and BUENFELD, N. R. Chloride Threshold Levels for Corrosion Induced Deterioration of Steel in Concrete”. In “*Chloride Penetration into Concrete*”: St-Remy-les-Chevreuses, France, October 15-18, 1995. *Proc. of the RILEM Intl. Workshop*, pp. 429-452.
- [13] HÁJEK, P., TEPLÝ, B. A KRÍSTEK, V. Trvale udržitelný rozvoj a betonové konstrukce (Sustainable Development and Concrete Structures, In Beton TKS, No. 4, 2002, pp. 40-42, (in Czech).
- [14] HOOTON, R. D., THOMAS, M. D. A., STANISH, K. *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*. Federal Highway Administration Publication, FHWARD-00-142, October 2001.
- [15] KERŠNER, Z., NOVÁK, D., TEPLÝ, B., BOHDANECKÝ, V. “Karbonatace betonu, koroze výztuže a životnost chladicí věže (Concrete Carbonation, Reinforcing Steel Corrosion and Cooling Tower Durability), *Sanace*, No. 4, 1996, pp. 21-23, (in Czech).
- [16] KONEČNÝ P., TIKALSKY, P. J., TEPKE, D. G. “Performance Assessment of a Concrete Bridge Deck Affected by Chloride Ingress by Using Simulation-Based Reliability Assessment and Finite Element Modeling“. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2028, pp. 3-8, Washington, DC, USA, 2007, ISSN: 0361-1981, ISBN: 978-0-309-10455-5.
- [17] KONEČNÝ, P., BROŽOVSKÝ, J. GHOSH, P. The home page of the „KOROZEENECK 1.0“ software: <<http://fast10.vsb.cz/konecny/korozeeneck.php>>, 2010.

- [18] KONEČNÝ, P. (2007): Simulace korelovaných neparametrických rozdělení v rámci metody SBRA, In *Sborník vědeckých prací Fakulty Stavební VŠB-TU Ostrava*, pp. 199-209, Ostrava, ISBN 978-80-248-1661-6, ISSN 1213-1962.
- [19] LIU, Y and WEYERS, R. E. *Modelling the Time-to-Corrosion Cracking in Chloride Contaminated Reinforced Concrete Structures*, in *ACI Materials Journal*, V.95, No.6. ,November-decemeber 1998.
- [20] MAREK, P., BROZZETTI, J., GUŠTAR, M. and TIKALSKY P (editors). *Probabilistic Assessment of Structures using Monte Carlo simulation. Basics, Exercises, Software*, ITAM Academy of Sciences Czech Republic, (CD ROM attached). 2ND edition, 2003, ISBN: 80-86246-19-1.
- [21] MAREK, P., GUŠTAR, M. and ANAGNOS, T. *Simulation-Based Reliability Assessment for Structural Engineers*. CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 1995, ISBN: 0-8493-8286-6.
- [22] MAREK, P., GUŠTAR, M., PERMAUL, K. Transition from Partial Factors Method to Simulation Based Reliability Assessment in Structural Design. *Journal: Probabilistic Engineering Mechanics* 14, 1999, pp. 105-118, Elsevier Science Ltd. (in English).
- [23] MATESOVÁ, D., PERNICA, F., TEPLÝ, B. Limit States for Durability Design – Modelling and the Time Format, In: *Sborník konference Modelování v Mechanice*, Ostrava, 2006.
- [24] MATESOVÁ, D. and VOŘECHOVSKÝ, M. Analytical and numerical approaches to modeling of reinforcement corrosion in concrete. In A. Zingoni, editor, SEMC 2007, *Third international conference on structural engineering, mechanics and computation*, held in Cape Town, South Africa, pages 227-228, full papers on CD-ROM, Rotterdam, the Netherlands, 2007. University of Cape Town, Millpress.
- [25] MORRIS, W, VICO, A., VAYQUEZ, M., DE SANCHEZ, S. R. (2002) Corrosion of reinforcing steel evaluated by means of concrete resistivity measurements, *Corrosion Science* 44, 2002, pp. 81-99. ISSN: 0010-938X.
- [26] PHOON, K., K., QUEK, S., T., HUANG, H., „Simulation of non-Gaussian Processes using fractile correlation, in *Probabilistic Engineering Mechanics*“, vol 19, p. 287-292, 2004.
- [27] TEPLÝ, B., KERŠNER, Z., ROVNANÍK, P. AND CHROMÁ, M. Durability vs. Reliability of RC structures, In proceedings of 10DBMC *International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, France, 17-20 April 2005.
- [28] TEPLÝ, B., NOVÁK, D., KERŠNER, Z., LAWANWISUT, W. “Deterioration of reinforced concrete: Probabilistic and sensitivity analyses”, *Acta Polytechnica*, vol. 39, no. 2, pp. 7-22, Prague, 1999, ISSN 1210-2709.
- [29] TIKALSKY, P. (2003). “Chapter 20 Durability and Performance-Based design using SBRA“ in [20].
- [30] TIKALSKY, P., J. and PUSTKA, D., MAREK, P. “Statistical Variations in Chloride Diffusion in Concrete”, *ACI Structural Journal*, vol. 102, is. 3, 2005, ISSN: 0889-3241.
- [31] TUUTTI, K. “Corrosion of steel in concrete“, *CBI Research Report 4:82*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982.
- [32] VIDAL, T. CASTEL, A and FRANCOIS, R. *Cement and Concrete Research* 34 (2004) 165-174, 2004, ISSN 0008-8846.
- [33] STEWART, M. G. Spatial variability of pitting corrosion and its influence on structural fragility and reliability of RC beams in flexure. *Structural Safety* 26(4)“ 453-470, ISSN: 0167-4730, 2004.
- [34] ZEMAJTIS, J. Modeling the Time to Corrosion Initiation for Concretes with Mineral Admixtures and/or Corrosion Inhibitors in Chloride-Laden Environments , Dissertation at Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA, 1998.

Oponentní posudek vypracovali:

Ing. Miroslav Sýkora, Ph.D., Kloknerův ústav, ČVUT Praha.

Ing. Dita Vořechovská, Ph.D., Fakulta stavební, VUT Brno.